# 地面弥雾机与六旋翼植保无人机在芒果冠层中雾滴沉积性能对比

李扬帆[1,2], 何雄奎[1,2*], 韩 冷[1,2], 黄 战[1,2], 何 苗[1,2]

(1. 中国农业大学 理学院,北京 100193; 2. 中国农业大学 农业无人机系统研究院,北京 101206)

**摘 要:** 为解决芒果园传统植保作业中农药用量大、施药不均匀、作业效率低等问题，并构建智慧芒果园，本研究对比了地面弥雾机和六旋翼植保无人机两种果园施药机具在芒果冠层中的药液雾滴沉积性能。将芒果冠层分为上中下层，以柠檬黄为示踪剂，使用高清相纸与滤纸采集药液雾滴，通过图像处理等手段分析雾滴沉积分布均匀性。试验结果表明，植保无人机在芒果树上部冠层叶片表面的雾滴覆盖率显著高于地面弥雾机，在其余冠层部位，两种施药机具在叶片表面药液无显著差异覆盖；植保无人机处理组叶片正反面平均覆盖率均为地面弥雾机的1.5～2倍，对叶片背面的防治优于地面弥雾机。地面弥雾机处理组叶片正面雾滴密度显著高于植保无人机，叶片背面无显著差异，植保无人机处理组正反面均未满足低量喷雾20个/cm$^2$的病虫害防治要求。地面弥雾机药液沉积集中在中下冠层（61.1%），植保无人机集中在上部冠层（43.0%），冠层内部沉积比例地面弥雾机（48.6%）＞植保无人机（25.5%），但地面弥雾机在冠层上部沉积能力不足，沉积占比仅为17%。研究表明，相较于植保无人机，地面弥雾机适用于芒果冠层中下部及内部病虫害防治，同时该机具较高的雾滴覆盖密度在喷洒杀菌剂时也有明显优势，植保无人机适用于针对芒果上部冠层如蓟马、炭疽等易发于外部花絮的病虫害防治。

**关键词:** 智慧芒果园；弥雾机；植保无人机；雾滴沉积分布均匀性；病虫害防治

**中图分类号:** S435;S49 **文献标志码:** A **文章编号:** SA202207007

引用格式:李扬帆, 何雄奎, 韩冷, 黄战, 何苗. 地面弥雾机与六旋翼植保无人机在芒果冠层中雾滴沉积性能对比[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(3): 53-62.

LI Yangfan, HE Xiongkui, HAN Leng, HUANG Zhan, HE Miao. Comparison of droplet deposition performance between caterpillar mist sprayer and six-rotor unmanned aerial vehicle in mango canopy[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(3): 53-62. (in Chinese with English abstract)

## 1 引 言

中国是世界第二大芒果生产国，截至2020年，全国芒果种植面积达34.94万公顷（524.1万亩），总产量330.6万吨[1]。芒果为热带水果，种植园区广泛分布于热带雨林气候，病虫害爆发频率高、各产地病虫害发生特点与规律不一致等问题成了芒果树植保作业中的难点[2]。芒果园常见的病害主要有炭疽病、细菌性角斑病、白粉病，虫害包括蓟马、象甲等[3,4]。

采用背负式喷雾器与高压管路喷枪等为主的施药器械进行人工化学防治[5]随意性强、药液

收稿日期：2022-07-16

基金项目：现代农业产业技术体系-国家梨产业技术体系（CARS-28）；国家自然科学基金资助项目（31761133019）；中国农业大学2115人才培育发展支持计划；三亚中国农业大学研究院引导资金项目（SYND-2021-06）

作者简介：李扬帆（1998—），男，博士研究生，研究方向为植保无人机与施药技术。E-mail：280541660@qq.com

*通信作者：何雄奎（1966—），男，博士，教授，研究方向为农业无人机系统及植保技术。E-mail：xiongkui@cau.edu.cn

难以均匀覆盖、农药利用率低[6]。近年来随着技术的成熟，植保无人机被大量应用在果园病虫害防治中。目前国内外针对植保无人机在果园作业中的研究主要集中在通过改变技术参数的方式来评价雾滴在作物冠层内的总体平均沉积水平，进而评定施药效果[7-11]。相比于地基植保作业，植保无人机有着更优秀的地形适应能力与作业效率。然而，植保无人机施药存在雾滴沉积均匀性差、叶片背面着药不足、雾滴飘移等严重问题[12, 13]，其高浓度农药作业往往产生药害，灼伤作物表面，在面对不同防治对象时存在一定局限。

欧美国家多数地区果园地形与中国差异较大，果园标准化程度与机械化作业水平高，果园植保作业基本采用地面风送喷雾机[14, 15]。相比于植保无人机，果园地面喷雾机能减少飘移，增加药液在冠层中分布均匀性[16]。目前，强靶标针对定向喷雾技术成为国内外研究热点[17-19]，集感知探测、智能决策、变量控制喷洒的智能果园喷雾技术被开发出来[19-24]。然而，果园复杂环境植保作业仍面临着大中型机械进园难、适用性差，小型机械独立作业药液无法有效穿透的果树冠层等问题[25]。

基于上述问题，为明确地面弥雾机和六旋翼电动植保无人机在芒果园植保作业中的应用场景，本研究对比分析两类施药机具在芒果树冠层中的药液沉积性能，以期为降低人力成本、提高作业效率、减少农药用量等提供技术参数与参考依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验设备

选用植保无人飞机（大疆T30型，图1（a），以下简称植保无人机，Unmanned Aerial Vehicle，UAV）与地面自走遥控式弥雾机（山西农谷飞农植保科技有限公司，3WDZ-200D型，图1（b），以下简称地面弥雾机）作为对比机型，两者装备参数如表1所示。植保无人机飞行模式采用遥控器打点自主果树作业模式，可定高、定速作业。地面弥雾机由参试人员通过遥控进行操控。



(a)植保无人机



(b)地面弥雾机

图1 植保无人机与地面弥雾机

Fig. 1 Unmanned aerial vehicle and caterpillar mist sprayer

**表1 植保无人机与地面弥雾机主要参数**

Table 1 Main parameters and performance indexes of UAV and caterpillar mist sprayer

| 作业机具 | 机具尺寸/mm×mm×mm | 最大载药量/L | 喷头型号×数量 | 喷头最大流量/(L·min$^{-1}$) | 最大作业速度/(m·s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 植保无人机 | 2858×2685×790 | 30 | TEEJET 11002VS×16 | 8.5 | 7 |
| 地面弥雾机 | 1935×1140×690 | 200 | XR45/01S×4 XR95/02S×2 | 16 | 1.25 |

### 2.2 试验场地

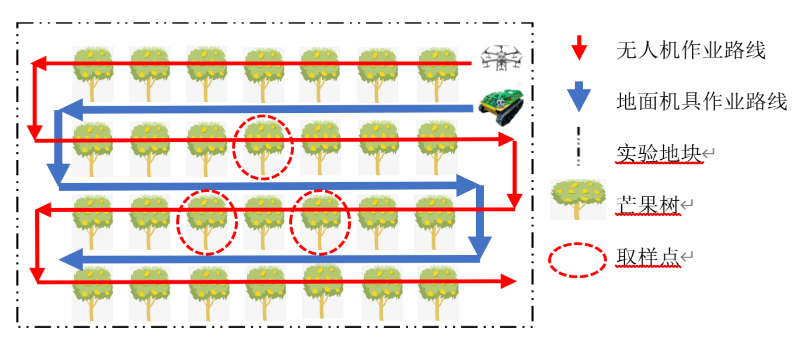
试验于2022年2月28日进行，试验场地位于海南省三亚市崖州区大哺叭村（109°18′8728″ E，18°43′2527″N），试验期间平均气温32.3 ℃，平均湿度41%，平均风速0.5 m/s。芒果树品种为贵妃芒，树龄7～8年。

芒果树种植概况：平均株高2.70～2.90 m，冠径为3.2 m，株距4.5 m，行距5 m，芒果树生长状况良好，叶片发育完全，冠层叶片呈伞状分布，树干中心几乎没有叶片，果园位于平地，场地空旷无障碍物。

### 2.3 试验方案设计

在试验田中选取30 m×20 m的小区作为实验区域（图2），选取小区内不相邻且长势均匀的

3棵芒果树布置样品，试验设置两个处理组，分别为地面弥雾机施药与植保无人机施药，两组处理试验参数如表2所示。植保无人机初始航向沿树行方向由北向南，飞行方式为行上飞行，地面弥雾机采用行间喷洒模式。试验采用柠檬黄作为示踪剂，喷雾液为柠檬黄水溶液。

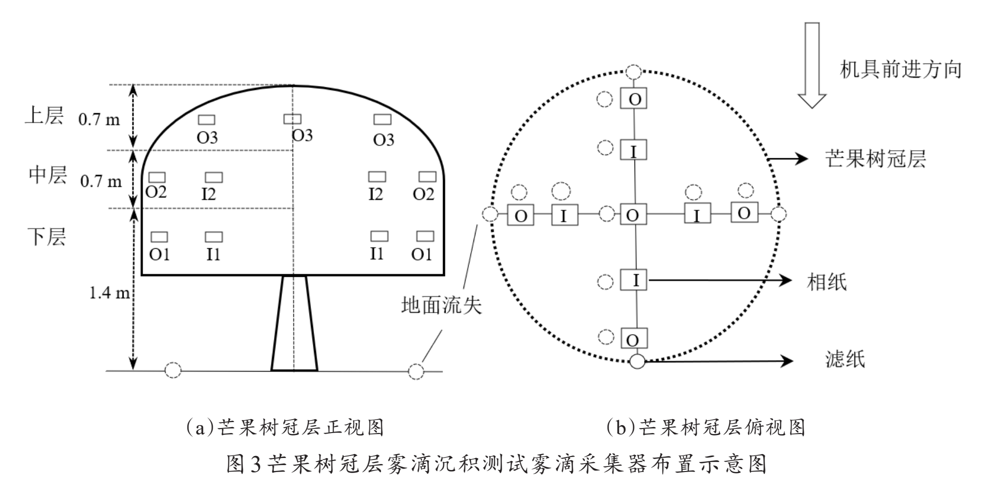



(a)植保无人机和地面弥雾机行走路线示意图

(b)试验地块选取

图2 植保无人机和地面弥雾机行走路线及试验地块示意图

Fig. 2 Work lines of UAV and caterpillar mist sprayer and schematic diagram of site layout




(a)芒果树冠层正视图　　(b)芒果树冠层俯视图

图3 芒果树冠层雾滴沉积测试雾滴采集器布置示意图

Fig 3. Sampler locations for assessing mango tree canopy spray deposition

**表2 芒果树喷雾试验设计及机具作业参数**

Table 2 The mango tree spray test design and sprayers' parameters

| 处理组 | 喷洒用量/(L·hm$^{-2}$) | 柠檬黄浓度/(g·L$^{-1}$) | 作业速度/(m·s$^{-1}$) | 无人机飞高/m | 喷洒路线 |
|---|---|---|---|---|---|
| 植保无人机 | 0.4 | 4.20 | 2.5 | 3 | 行上飞行 |
| 地面弥雾机 | 2.27 | 0.40 | 1.25 | / | 行间喷洒 |

使用高清相纸和直径7 cm滤纸收集雾滴。雾滴采集器布样示意图如图3所示，将芒果树分成上中下三层，下层外侧样品标记为O1，下层内侧标记为I1，中层外侧样品标记为O2，中层内侧标记为I2，由于芒果树冠层生长特性（本次实验选取的芒果树冠层呈伞状分布，冠层中间无叶片），中下冠层中心与上部冠层不设内侧样品，上部冠层样品标记为O3，滤纸布置在相纸周围5 cm内，两者互无遮挡，以检测药液沉积量，叶片正反面均布有相纸和滤纸。在下层四个O1样品于地面投影处放置4张滤纸以收集药液地面流失。每组处理设置两次重复。

## 2.4 数据分析方法

作业结束5 min后，所有相纸收入名片夹相应位置，将名片夹装入12号自封袋中，加入干

燥剂防止样品受潮影响测试结果，于5日内带回实验室中经扫描仪（EPSON DS-1610）以600 dpi扫描后，使用DepositScan软件分析液滴雾滴沉积情况。滤纸装入6号自封袋中，并将所有滤纸样品归置入黑色收纳袋中避光保存，于5日内带回实验室中进行分析。往自封袋中加入20 mL去离子水（地面弥雾机组为5 mL）洗脱后过酶标仪（450 nm波长，美国iMark分析仪器有限公司）分析，计算沉积量。每次施药后收集各处理组母液各20 mL，100倍稀释。药液沉积分布的均匀性以变异系数（CV，%）表示，较低的CV值意味着药液雾滴覆盖分布的均匀性更好。单位沉积量以$\beta$（μL/cm²）表示，如公式（1）所示：

$$\beta = \frac{C \times V}{a \times A} \tag{1}$$

其中，$\beta$为沉积量，μL/cm²；$C$为示踪剂浓度，μg/mL；$V$为洗脱液体积，mL；$a$为滤纸面积，cm²；$A$为母液浓度，g/L。

水平方向穿透系数$K_H$计算如公式（2）所示：

$$K_H = \frac{\beta_I}{\beta_O} \times 100\% \tag{2}$$

其中，$\beta_I$为冠层内侧药液单位沉积量，μL/cm²；$\beta_O$为冠层外侧药液单位沉积量，μL/cm²。

同理，竖直方向穿透系数$K_V$计算如公式（3）所示：

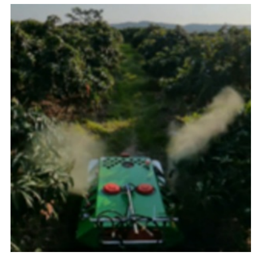
$$K_V = \frac{\beta_a}{\beta_{b\&c}} \times 100\% \tag{3}$$

其中，$\beta_a$地面弥雾机处理组为上冠层药液单位沉积量，μL/cm²，植保无人机处理组为下冠层；$\beta_{b\&c}$地面弥雾机处理组为中下冠层药液单位沉积量平均值，μL/cm²，植保无人机处理组为中上冠层。

竖直方向单位面积沉积分布百分比（$R_V$，%）用于表征药液有效成分在竖直方向上的分配比例，当冠层各部位该数值越接近，竖直方向药液沉积越均匀，计算如公式（4）所示：

$$R_V = \frac{\beta_{dep}}{\overline{\beta_U} + \overline{\beta_M} + \overline{\beta_L} + \overline{\beta_G}} \times 100\% \tag{4}$$

其中，$\beta_{dep}$为竖直方向某一部位单位沉积量，μL/cm²；$\beta_U$、$\beta_M$、$\beta_L$、$\beta_G$分别为上层、中层、下层、地面流失的单位沉积量，μL/cm²。



(a)地面弥雾机喷雾测试


(b)植保无人机喷雾测试


(c)芒果树冠层


(d)芒果树叶片

图4 芒果树喷雾试验测试现场

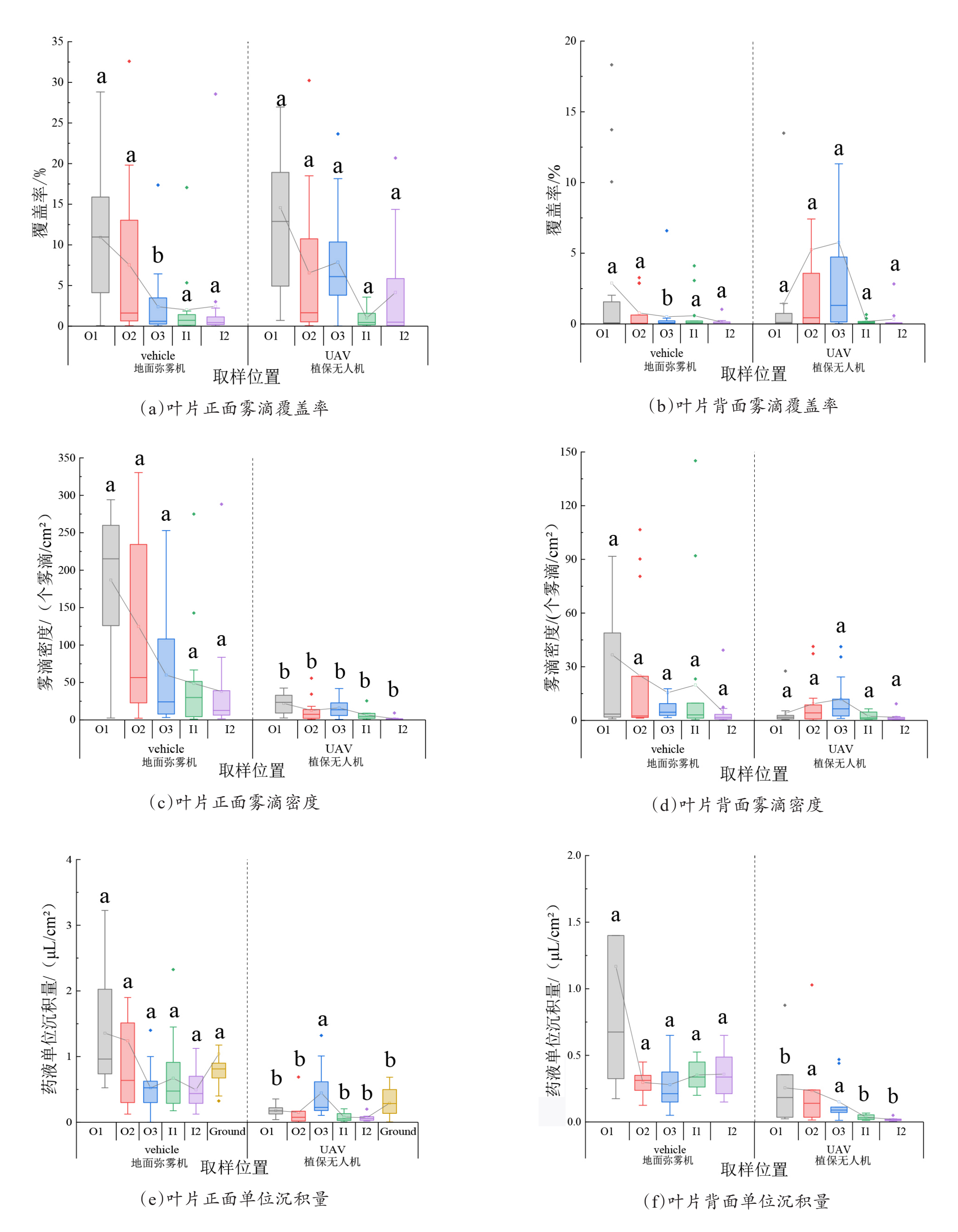
Fig. 4 Mango tree spray test site

## 3 结果与分析

### 3.1 雾滴覆盖率与雾滴密度分析

图5展示了地面弥雾机及植保无人机两种施药机具在芒果树叶片正反面雾滴沉积覆盖率（图5（a）和图5（b））与雾滴沉积密度（图5（c）和图5（d）），并展示了两种机具在各冠层部位的雾滴沉积分布情况的显著性差异分析结果。由图5可知，地面弥雾机处理组药液覆盖主要集中在中下层外部叶片正面，其余部位雾滴覆盖率均不足5%，并呈现从下到上，从外到内递减的趋势，但得益于该机具较高的作业压力，产生的细雾滴（在雾滴采集卡上经铺展后$D_{V50}$为170 μm）在冠层各部位叶片正面雾滴密度均能达到30个/cm²的防治需求[26]，整体雾滴覆盖密度为植保无人

机的6～7倍，部分区域能达到170个/cm²，该机具在喷施触杀性杀虫剂或保护性杀菌剂如波尔多液时有明显优势。




注：图中Ground为两种机具地面流失量，柱上不同字母均表示差异显著($P<0.05$，邓肯氏新复极差法)

图5　地面弥雾机与植保无人机叶片正反面雾滴覆盖率、雾滴密度和单位沉积量分布情况

Fig. 5　Droplet deposition and distribution uniformity of caterpillar mist sprayer and unmanned aerial vehicle in blade surface: coverage rate, droplet density and deposition

两种机具在冠层的总体雾滴沉积分布参数如表3所示，地面弥雾机处理组叶片背面覆盖率平均值仅为1%，低于植保无人机（2.72%），平均雾滴密度为20.7个/cm²，未满足防治需求。造成地面弥雾机在叶片背面雾滴覆盖率与雾滴密度远低于叶片正面的原因为：芒果冠层相比于梨树、苹果树冠层，其叶片长度长、硬度大，在风场中不易翻转或扰动，叶背不易沉积雾滴，并且芒果树郁闭度较高，叶片间相互遮掩严重，雾滴无法穿透外部叶片达到内部冠层，导致雾滴沉积覆盖率均匀性低。而该机具采用压送喷雾的方式向冠层输送雾滴，叶片很少发生翻转，高压输送的雾场又会导致部分叶片以一定角度吹起，从而在此处产生一定比例的高雾滴覆盖样品，根据图5（b）中该处理组的多个异常值可以印证这一猜想，同时也说明该种雾滴输送方式（图4（a））不适用于对芒果树冠层叶片背面病虫害的防治，可在现有机具上加装风送装置以增加雾滴穿透性及分布均匀性。

**表3　芒果树喷雾试验雾滴沉积分布参数**

Table 3  Droplet deposition and distribution parameters of mango tree spray test

| 雾滴沉积分布参数 | 处理组 | |
|---|---|---|
| | 地面弥雾机 | 植保无人机 |
| 叶片正面平均覆盖率 $C_{upp}$/% | 4.96±0.83 | 7.03±1.26 |
| 叶片背面平均覆盖率 $C_{und}$/% | 1.01±0.34 | 2.72±10.3 |
| 覆盖率平均值 $\bar{C}$/% | 2.99 | 4.88 |
| 叶片正面平均雾滴密度 $N_{upp}$/(个·cm$^{-2}$) | 101.5±11.1 | 12.25±1.8 |
| 叶片背面平均雾滴密度 $N_{und}$/(个·cm$^{-2}$) | 20.7±4.8 | 6.09±1.3 |
| 雾滴密度平均值 $\bar{N}$/(个·cm$^{-2}$) | 61.1 | 9.2 |
| 叶片正面平均单位沉积量 $\beta_{upp}$/(μL·cm$^{-2}$) | 0.88±0.13 | 0.20±0.04 |
| 叶片背面平均单位沉积量 $\beta_{und}$/(μL·cm$^{-2}$) | 0.45±0.10 | 0.13±0.03 |
| 单位沉积量平均值 $\bar{\beta}$/(μL·cm$^{-2}$) | 0.67 | 0.16 |
| 雾滴粒径平均值 $D_{V50}$/μm | 170.6±8.6 | 631.4±63.1 |
| 雾滴覆盖率分布均匀性CV/% | 165.9 | 148.5 |
| 叶片背面覆盖率占正面百分比 $R_c$/% | 20.4 | 38.7 |
| 内部沉积占比 $R_d$/% | 37.1 | 18.0 |
| 垂直穿透系数 $K_V$/% | 27.8 | 33.4 |
| 水平穿透系数 $K_H$/% | 48.6 | 25.5 |
| 地面流失比率 $R_{Groundloss}$/% | 21.8 | 21.2 |

注：表中部分数据以平均值±标准误表示

植保无人机喷雾如图4（b）所示，由于芒果树冠层呈伞状分布，植保无人机经过芒果树顶端时下洗气流场会产生扩散效应，因此使用植保无人机施药时，药液覆盖率在竖直方向并没有表现出明显的递减趋势，除I1处，各部位叶片正面雾滴覆盖率均能满足2%的需求。除冠层顶部（O3处），两种机具在其余部位雾滴覆盖率无显著差别，根据表3植保无人机处理组正面平均覆盖率为7.03%，为地面弥雾机的1.4倍，叶片背面整体平均覆盖率为地面弥雾机的2.7倍。但由于植保无人机雾化性能较差，产生的大雾滴（在雾滴采集卡上经铺展后 $D_{V50}$ 为631 μm）在叶片正反面雾滴密度均不足以满足低量喷雾20个/cm²的病虫害防治要求[27]，平均雾滴密度仅为9.2个/cm²，地面弥雾机处理组该数值为61.1个/cm²，因此，植保无人机喷施部分保护性杀菌剂时，该机具劣势较明显，可更换更低流量喷头或加装离心喷头以增加药液雾化效果。

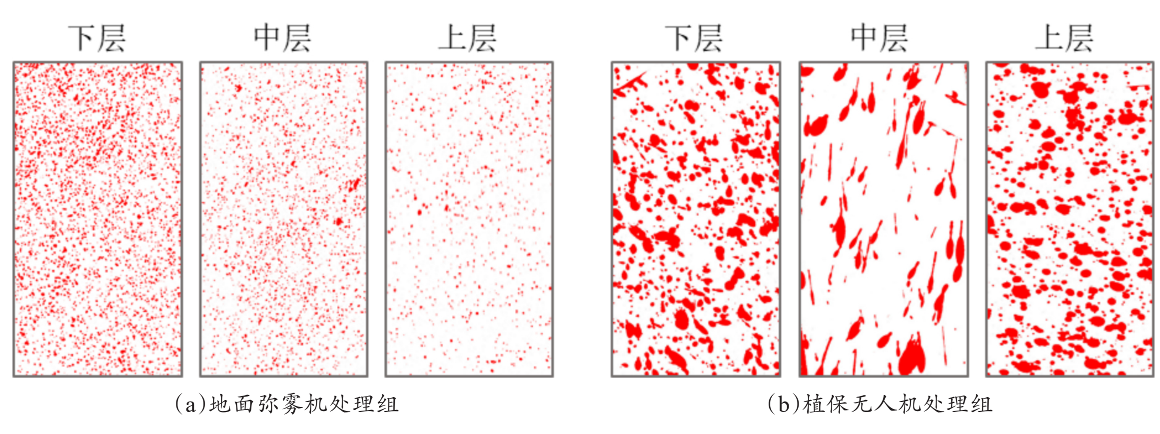
由表3可知，地面弥雾机处理组叶片背面覆盖率占正面百分比Kc为20%，植保无人机处理组为38.7%，植保无人机对叶片背面的防治效果优于地面弥雾机，根据图5（b）该处理组在O3处叶片背面覆盖率能达到5%，但样品重复性差。由图5（a）和图5（b）得出：两组处理雾滴覆盖率数值分布广泛，植保无人机处理组药液覆盖率分布均匀性（CV值）为148.5%，低于地面弥雾机（165.9%），造成两种施药机具整体雾滴沉积分布均匀性较差的原因为：

（1）芒果树冠层郁闭度高（图4（c）），叶片间相互遮挡部位多，且药液不易穿透外部冠层达到内部，多数药液沉积在冠层外部。

（2）芒果树叶片叶倾角呈圆弧形，叶片较长，冠层整体叶倾角分布复杂（图4（d）），同一叶片上不同位置药液沉积差异大，传统的雾滴采集方法对芒果树上雾滴沉积性能的评判精确度不足。

（3）地面弥雾机缺乏雾滴辅助扩散装置，导致个别部位过度沉积，植保无人机则缺乏更有效的雾化方式。

两组处理雾滴沉积扫描结果如图6所示，根据雾滴扫描结果可知：由于芒果树叶片整体叶倾角分布复杂，植保无人机喷雾产生的大雾滴易在叶片上产生滑落，造成农药流失。此外，地面弥雾机施药量虽为植保无人机的5～6倍，但该机具缺乏雾滴辅助扩散装置，药液从喷头到作物叶片表面需要一定时间，导致部分药液挥发、飘失，减少了叶片表面覆盖率。




(a)地面弥雾机处理组　　(b)植保无人机处理组

图6 地面弥雾机与植保无人机雾滴采集扫描图

Fig. 6 The scan results of caterpillar mist sprayer and UAV treatment droplet collecting card

### 3.2 沉积量与穿透性分析

各试验处理组药液沉积量如图5（e）和图5（f）所示，结果显示：除O3处，其余部位地面弥雾机处理组叶片正面药液单位沉积量显著高于植保无人机。因地面弥雾机施药量大，内部冠层叶片背面沉积量相对植保无人机也显著提高，根据公式（4）计算的两种机具在竖直方向沉积分布占比如表4示。地面弥雾机处理组药液沉积集中于中下冠层外部（占比61%），但上部冠层单位沉积量为0.38 μL/cm$^2$，仅为平均沉积量的47.0%，植保无人机处理组在上层沉积比重最高（43.0%）。

根据表3，地面弥雾机处理组内部冠层沉积占比为37.1%，植保无人机仅为18.0%，水平穿透系数地面弥雾机（48.6%）＞植保无人机（25.5%），说明在本次试验植保无人机的风场及作业参数条件下，农药雾滴仍无法穿透外部冠层，需对作业参数进行进一步优化，而地面弥雾机产生的细雾滴有利于向内部输送药液。

两种机具地面流失比率均为21%左右，实际作业中，植保无人机更易受气候影响而产生飘失，此外，在病虫害高发期，植保无人机植保作业往往以较高的药液浓度进行，增加了药液对果树灼伤的风险。

**表4 地面弥雾机与植保无人机施药冠层各部位沉积占比**

Table 4 Deposition rate in different parts of the canopy of caterpillar mist sprayer and UAV treatment

| 处理组 | 冠层部位沉积占比/% | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 上层 | 中层 | 下层 | 地面流失 |
| 地面弥雾机 | 17 | 25 | 36 | 22 |
| 植保无人机 | 43 | 16 | 20 | 21 |

## 4 结论与展望

本研究通过试验对比了六旋翼植保无人机与地面弥雾机两种施药机具在芒果树上的雾滴沉积分布特性，结果表明：

（1）植保无人机施药在上部冠层叶片表面雾滴覆盖率显著高于地面弥雾机，其余部位两种施药机具无显著差异。植保无人机处理组叶片正反面平均覆盖率均为地面弥雾机的1.5～2倍，对叶片背面的防治优于地面弥雾机。地面弥雾机处理组叶片正面雾滴密度显著高于植保无人机，叶片背面则无显著差异，植保无人机叶片正反面均未满足低量喷雾20个/cm$^2$的病虫害防治要求。地面

弥雾机药液沉积集中在中下冠层（61.1%），植保无人机处理组则集中在上部冠层（43.0%），冠层内部沉积比例地面弥雾机（48.6%）＞植保无人机（25.5%）。

（2）由于芒果树冠层郁闭度高，叶片长度、厚度大，叶倾角分布复杂等生长特性，两种机具针对芒果树施药沉积分布均匀性较差，总体CV值均超过100%。

（3）根据试验结果，两种施药机具在芒果树冠层中的施药沉积分布各有优势与缺陷。相比于植保无人机，地面弥雾机适用于冠层中下部及内部病虫害防治，具且该机具较高的雾滴覆盖密度（60个/cm²），适用于喷施触杀性杀虫剂及保护性杀菌剂如波尔多液，但在冠层上部沉积能力不足、整体施药均匀性差等问题可通过加装风送装置以增加该机具施药效果。

植保无人机相比与地面弥雾机在冠层外部叶片表面有较好的着药能力与地形适应性，适用于针对芒果上部冠层如蓟马、炭疽等易发于外部花絮的病虫害防治，但植保无人机向芒果冠层内部输送药液的能力不如地面弥雾机，可在此基础上改进雾化方式，增强雾滴穿透性，或改变植保无人机作业参数，增加雾滴沉积分布均匀性。

未来将开发一套植保无人机与地面弥雾机协同作业的空地协同立体植保作业系统，两种施药机具针对同一地块先后进行作业，在喷雾过程互不干扰的情况下，将一定量农药通过两种施药机具分散至果树冠层中（按照不同施药配比），发挥地面弥雾机在果树中下层及内部冠层优良的沉积性能，再由植保无人机对地面弥雾机上部冠层沉积不足的劣势进行补充，同时在地面弥雾机无法通行的地势由植保无人机进行二次补喷，实现果园植保作业果树冠层的均匀覆盖，会大幅提高药液在冠层中的沉积分布均匀性及农药有效利用率，在此基础上进行减量施药的研究，最后将果园智能植保作业系统（包括感知、决策及执行机构）应用在本研究两种施药机具中，将实现芒果园植保作业的无人化、智能化。

**参考文献：**


[1] 柯佑鹏. 浅析RCEP下海南芒果产业发展的挑战及出路[J]. 今日海南, 2022(3): 50-51.

[2] 岑艳喜. 芒果主要病虫害的发生及防治初探[J]. 南方农业, 2019, 13(9): 11-12.
CEN Y. Preliminary study on occurrence and control of main diseases and insect pests in mango[J]. South China Agriculture, 2019, 13(9): 11-12.

[3] 叶潇潇. 芒果主要病虫害的发生与防治[J]. 农业灾害研究, 2015, 5(9): 7-10.
YE X. Occurrence and control of mango fruit main diseases and pests[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2015, 5(9): 7-10.

[4] 邢楚明, 韩冬银, 李磊, 等. 蓟马在芒果园田间的时空动态[J]. 环境昆虫学报, 2017, 39(6): 1258-1265.
XING C, HAN D, LI L, et al. Spatio-temporal dynamics of thrips in mango orchard[J]. Chinese Journal of Environmental Entomology, 2017, 39(6): 1258-1265.

[5] 尹平发. 海南芒果病虫害防治技术[J]. 特种经济动植物, 2021, 24(7): 47-48.
YIN P. Technology of mango disease and insect pest control in Hainan[J]. Special Economic Animals and Plants, 2021, 24(7): 47-48.

[6] 何雄奎. 我国植保无人机喷雾系统与施药技术[J]. 农业工程技术, 2018, 38(9): 33-38.

[7] 朱晓锋, 王明, 徐兵强, 等. 核桃园植保无人机作业参数优选[J]. 植物保护, 2020, 46(4): 25-32.
ZHU X, WANG M, XU B, et al. Optimization of unmanned aerial vehicle (UAV) operation parameters in walnut orchards[J]. Plant Protection, 2020, 46(4): 25-32.

[8] WANG C, LIU Y, ZHANG Z, et al. Spray performance evaluation of a six-rotor unmanned aerial vehicle sprayer for pesticide application using an orchard operation mode in apple orchards[J]. Pest Management Science, 2022, 78(6): 2449-2466.

[9] MENG Y, SU J, SONG J, et al. Experimental evaluation of UAV spraying for peach trees of different shapes: Effects of operational parameters on droplet distribution[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 170: ID 105282.

[10] WANG C, HERBST A, ZENG A, et al. Assessment of

spray deposition, drift and mass balance from unmanned aerial vehicle sprayer using an artificial vineyard[J]. Science of The Total Environment, 2021, 777: ID 146181.

[11] 陈盛德, 兰玉彬, 周志艳, 等. 小型植保无人机喷雾参数对橘树冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(5): 97-102.
CHEN S, LAN Y, ZHOU Z, et al. Effects of spraying parameters of small plant protection UAV on droplets deposition distribution in citrus canopy[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(5): 97-102.

[12] 刘德江, 龚艳, 王果, 等. 果园航空喷雾的农药沉积分布比较[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(6): 207-211.

[13] 王昌陵, 何雄奎, 曾爱军, 等. 基于仿真果园试验台的植保无人机施药雾滴飘移测试方法与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 56-66.
WANG C, HE X, ZENG A, et al. Measuring method and experiment on spray drift of chemicals applied by UAV sprayer based on an artificial orchard test bench[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 56-66.

[14] 何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(1): 133-146.
HE X. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(1): 133-146.

[15] 何雄奎. 改变我国植保机械和施药技术严重落后的现状[J]. 农业工程学报, 2004(1): 13-15.
HE X. Improving severe draggling actuality of plant protection machinery and its application techniques[J]. Transactions of the CSAE, 2004(1): 13-15.

[16] 周良富, 薛新宇, 周立新, 等. 果园变量喷雾技术研究现状与前景分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 80-92.
ZHOU L, XUE X, ZHOU L, et al. Research situation and progress analysis on orchard variable rate spraying technology[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33 (23): 80-92.

[17] 张佳琛, 邓巍, 张燕. 恒压变量喷雾技术研究现状[J]. 农机化研究, 2015, 37(2): 257-260.
ZHANG J, DENG W, ZHANG Y. Status quo on research of constant pressure and variable-rate spraying technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(2): 257-260.

[18] PETERSON D L, HOGMIRE H W. Tunnel sprayer for dwarf fruit-trees[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(3): 709-715.

[19] 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 等. 基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 70-76.
LI L, HE X, SONG J, et al. Design and experiment of automatic profiling orchard sprayer based on variable air volume and flow rate[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 70-76.

[20] ESCOLÀ A, ROSELL-POLO J R, PLANAS S, et al. Variable rate sprayer. Part 1—Orchard prototype: Design, implementation and validation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 95: 122-135.

[21] 闫成功, 徐丽明, 袁全春, 等. 基于双目视觉的葡萄园变量喷雾控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 13-22.
YAN C, XU L, YUAN Q, et al. Design and experiments of vineyard variable spraying control system based on binocular vision[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(11): 13-22.

[22] 宋淑然, 陈建泽, 洪添胜, 等. 果园柔性对靶喷雾装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 57-63.
SONG S, CHEN J, HONG T, et al. Design and experiment of orchard flexible targeted spray device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 57-63.

[23] 范道全, 张美娜, 潘健, 等. 基于靶标叶面积密度参数的变量喷雾控制系统开发与性能试验[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(3): 60-69.
FAN D, ZHANG M, PAN J, et al. Development and performance test of variable spray control system based on target leaf area density parameters[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(3): 60-69.

[24] OSTERMAN A, GODEŠA T, HOČEVAR M, et al. Real-time positioning algorithm for variable-geometry air-assisted orchard sprayer[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98: 175-182.

[25] 孙诚达, 柳长鼎. 风送喷雾雾滴冠层穿透模型构建及

应用[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 25-32.
SUN C, LIU C. Construction and application of droplet canopy penetration model for air-assisted spraying pattern[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(15): 25-32.

[26] GB/T17997-2008. 农药喷雾机(器)田间操作规程及喷洒质量评定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[27] MH/T 1002.1-2016. 农业航空作业质量技术指标 . 喷洒作业[S]. 北京: 中国民用航空局, 1995.

# Comparison of Droplet Deposition Performance Between Caterpillar Mist Sprayer and Six-Rotor Unmanned Aerial Vehicle in Mango Canopy

LI Yangfan[1,2], HE Xiongkui[1,2*], HAN Leng[1,2], HUANG Zhan[1,2], HE Miao[1,2]

（1. *College of Science*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100193, *China*;
2. *College of Agricultural Unmanned System*, *China Agricultural University*, *Beijing* 101206, *China*）



**Abstract:** In order to solve the problems of pesticides abuse, nonuniformity deposition and low operating efficiency, build up the smart mango orchard, sedimentary properties of liquids in mango canopy of two orchard pesticide machinery, i.e., orchard caterpillar mist sprayer and six-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) of were compared. Mango canopy was divided into upper, middle and lower canopy, tartrazine wsa selected as the tracer, high-definition printing paper and filter paper were used to collect pesticide droplets, the image processing methods such as deposition distribution uniformity were used to analyze the droplets. The experimental results showed that, for the surface droplets coverage rate of upper canopy leaf, unmanned aerial vehicle (UAV) was significantly higher than the cartipillar mist sprayer, there was no significant difference for the middle and lower canopy leaf. The the average coverage rate of both the front and back of leaves in UAV treatment group were 1.5~2 times for cartipillar mist sprayer, and got more deposition in back of leaves compare with caterpillar mist sprayer. The density of droplets on the front of the leaves of the mist sprayer treatment was significantly higher than that of the UAV treatment, but there was no significant difference on the back of the leaves. Both the front and back of the leaves of the plant protection UAV did not meet the requirements of disease and pest control with a low spray amount of 20/cm$^2$. The liquid deposition of mist sprayer concentrated in the middle and lower canopy (61.1%), and while for the UAVs, it concentrated in the upper canopy (43.0%). The proportion of the deposition in the canopy was higher than that of the UAVs (48.6%), but the deposition capacity of mist sprayer in the upper canopy was insufficient, accounting for only 17%. The research shows that, compared with UAV, caterpillar mist sprayer is more suitable for the pest control of lower and middlein canopy, at the same time, the high density of droplets cover also has obvious advantages when spraying fungicide. UAV is more suitable for the external tidbits pest control of upper mango canopy, such as thrips, anthrax. According to the experimental results, a stereoscopic plant protection system can be built up in which can use the advantages of both caterpillar mist sprayer and UAV to achieve uniform coverage of pesticide in the mango tree canopy.

**Key words:** smart mango orchard; misting machine; plant protection unmanned aerial vehicle; droplet deposition distribution uniformity; pest control